

자동차 프런트 샤시 모듈의 좌표 해석

이동목*, 양승한[#]

Dimensional Analysis for the Front Chassis Module in the Auto Industry

Dong-Mok Lee*, Seung-Han Yang[#]

ABSTRACT

The directional ability of an automobile has an influence on driver directly, and hence it must be given most priority. Alignment factors of automobile such as the camber, caster and toe directly affect the directional ability of a vehicle. The above mentioned factors are determined by the pose of interlinks in the assembly of an automobile front chassis module. Measuring the position of center point of ball joints in the front lower arm is very difficult. A method to determine this position is suggested in this paper. Pose estimation for front chassis module and dimensional evaluation to find the rotational characteristics of front lower arm were developed based on fundamental geometric techniques. To interpret the inspection data obtained for front chassis module, 3-D best fit method is needed. The best fit method determines the relationship between the nominal design coordinate system and the corresponding feature coordinate system. The least squares method based on singular value decomposition is used in this paper.

Key Words : Front chassis module(프런트 샤시 모듈), Dimensional analysis(좌표 해석), Pose estimation(자세 추정), Absolute orientation problem(절대위치결정문제), Least Squares (최소 자승)

기호설명

e^2	= P2-norm
L	= Line
P	= Position vector of center point
P_z	= Z value of circle's center point
PL	= Plane including three point
r	= Radius of circle
\hat{R}	= Optimized rotating transformation
S	= Diagonal matrix of eigenvalue

\hat{T}	= Optimized translation transformation
u	= Direction unit vector
u_z	= Z value of vector, u
U	= Orthogonal matrix
v	= Direction unit vector
v_z	= Z value of vector, v
V	= Orthogonal matrix
Z_0	= Z value of designed ball joint
θ	= Angle with vector, u
$\ \cdot \ $	= Euclidean distance

* 접수일: 2003년 11월 15일; 게재승인일: 2004년 5월 7일

* 경북대학교 대학원 기계공학과

교신저자: 경북대학교 기계공학부

E-mail syang@knu.ac.kr Tel. (053) 950-6569

1. 서론

자동차 주행시 운전자에게 직접적인 영향을 미치는 조향성능 관련 문제는 우선적으로 해결되어야 하지만, 관련 부품의 품질 및 공차에 대한 적절한 관리가 이루어지지 않고 있다. 자동차의 조향성능과 관련하여 영향을 많이 미치는 자동차 부품으로는 프런트 샤시 모듈이 있으며, 프런트 샤시 모듈과 관련된 조향성능 변수로는 캠버, 캐스터 그리고 토우등이 있다. 특히 프런트 샤시 모듈의 볼 조인트 위치는 조향성능 변수에 아주 중요한 영향을 미친다. 현재 프런트 샤시 모듈 자체에 대한 적부판단은 완성된 자동차의 시험주행을 통하여 이루어지며, 많은 재원을 낭비하는 비효율적인 방법이다. 하지만, 프런트 샤시 모듈의 효율적인 적부판단은 차체에 조립이 이루어지기 전, 적절한 측정 및 평가를 통하여 이루어질 수 있다.

프런트 샤시 모듈의 측정 데이터는 제작상의 오차와 측정상의 오차를 가지고 있으며, 정확하게 설계 데이터와 일치하지 않는다. 즉, 측정 데이터와 설계 데이터 사이에 최적 맞춤(Best fitting)을 하여야 한다. 형상의 기하학적 오차를 계산하는 최소자승법을 이용한 연구⁹와 심하게 왜곡된 측정 데이터의 경우를 위한 라그랑지 멀티플라이어를 고려한 최소자승법을 이용한 연구⁵ 등 두 데이터군 사이의 최적 맞춤 연구가 있었다.[1~9] 하지만, 자동차 프런트 샤시 모듈의 기하학적 특성을 고려하여 측정 데이터를 설계 데이터로 변환하는 연구는 없었다.

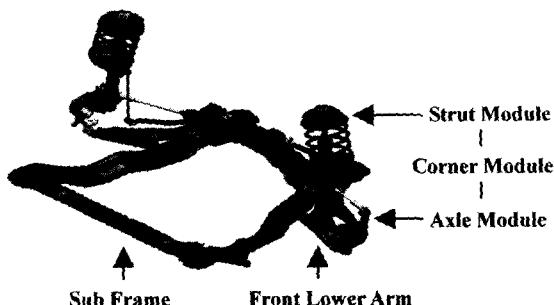


Fig. 1 Front chassis module

본 연구에서는, 프런트 샤시 모듈의 측정 데이터와 설계 데이터 사이의 최적 맞춤을 통하여 좌표해석을 하였다. 또한, 기존에 측정이 불가능하였던 볼 조인트 위치를 서브프레임의 기하학적 특징을 고려하여 계산하였다.

2. 프런트 샤시 모듈의 측정

2.1 서브프레임의 측정

프런트 샤시 모듈은 Fig. 1 과 같이 여러 구성 요소의 유기적 관계에 의하여 이루어진다. 차체와의 조립시, 서브프레임의 4 개 지지부에 물리적 접촉이 이루어지며 서브프레임의 조립자세에 의하여 프런트 샤시 모듈의 자세가 결정된다. 서브프레임은 4 개의 지지부로 구성이 되며, Fig. 2 와 같다.

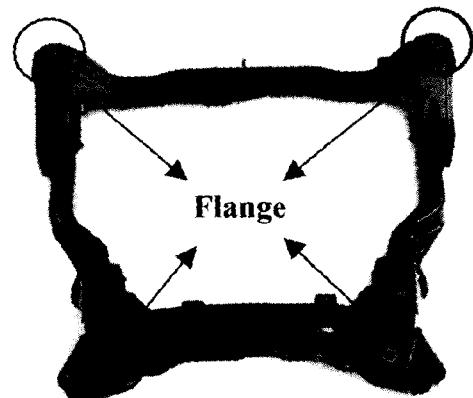


Fig. 2 Sub frame & flange



Fig. 3 Flange of sub frame

프런트 샤시 모듈의 기본 자세를 결정하기 위하여, 서브프레임의 지지부를 측정한다. 서브프레임의 지지부는 Fig. 3 과 같이 원통형으로

이루어져 있으며, 설계 도면상에 존재하는 데이터는 원통형 기구부의 중심점을 나타낸다. 중심점은 공간상에 존재하기 때문에, 직접적인 측정이 불가능하다. 공간상에 존재하는 중심점을 계산하기 위하여, 원통형 상단원호의 세 점을 측정하고 원을 정의하였다. 정의된 원을 이용하여 원의 중심점을 구하였으며, 이를 설계 데이터와 비교되는 측정 데이터로 정의하였다.

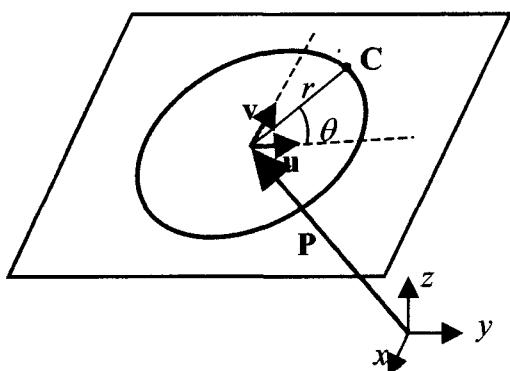


Fig. 4 Definition of circle on space

$$C(\mathbf{P}, \mathbf{u}, \mathbf{v}, r, \theta) = \mathbf{P} + r (\mathbf{u} \times \cos \theta + \mathbf{v} \times \sin \theta) \quad (1)$$

원은 한 평면상에 존재하기 때문에 원을 정의하기 위해서는 평면의 정보를 이용하여야 한다. 공간상에 존재하는 원의 정의는 Fig. 4에 나타나 있으며, 수학적 표현은 식 (1)과 같다.

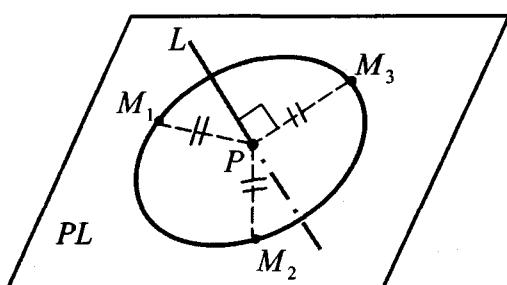


Fig. 5 Method to calculate circle using 3-points

$$PL \cap L = \mathbf{P}, \quad \|\overrightarrow{\mathbf{PM}_1}\| = r \quad (2)$$

세 점으로부터 같은 거리에 있는 점들의 집합은 직선이 되며, 이 직선과 3 점이 이루는 평면의 교점은 원의 중심점이 된다. 세 점을 이용한 원의 계산 방법은 Fig. 5에 나타나 있으며, 수학적 표현은 식 (2)와 같다.

2.2 프렌트 로우어 암의 측정

조향성능 변수와 밀접한 관계를 가지는 볼 조인트는 Fig. 6과 같이 프렌트 로우어 암의 끝부위에 존재한다. 볼 조인트는 킹핀의 내부에 존재하며 덮개에 의하여 직접적인 측정이 불가능하다. 하지만 Fig. 7과 같이 두 자세의 킹핀 상단면을 측정하여 옵셋거리(D)를 계산함으로써, 내부에 존재하는 볼 조인트의 위치를 계산한다.

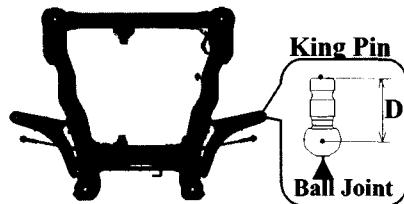


Fig. 6 Location of ball joint

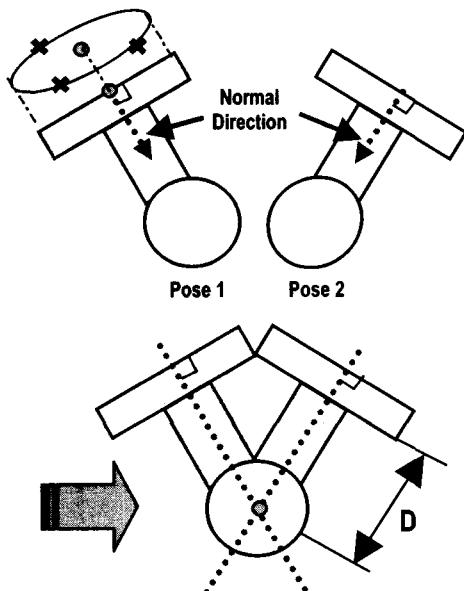


Fig. 7 Method to find king-pin-offset distance

프런트 로우어 암은 공간상에서 제한된 회전 운동을 한다. 회전운동을 파악하기 위하여, 프런트 로우어 암의 상 · 중 · 하의 3 차세에서의 볼 조인트 위치를 계산한다. 계산된 볼 조인트의 3 점 데이터를 이용하여 공간상에 원을 정의하며, 프런트 로우어 암의 회전거동을 파악한다. 이는 Fig. 8 에 나타나 있다.

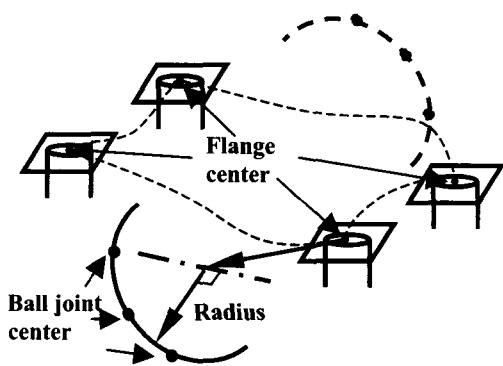


Fig. 8 Rotating circle of front lower arm

설계 도면에는 볼 조인트와 관련하여 한 점의 데이터만 존재한다. 프런트 로우어 암의 측정을 통하여 파악한 회전거동과 설계상의 점의 데이터를 비교하기 위하여, 파악한 회전거동상의 한 점을 계산한다. 회전거동상의 한 점을 나타내기 위하여, 설계 볼 조인트의 z 값에서의 점을 계산하였으며 식 (3)에 나타나 있다.

$$\begin{aligned} z_0 &= P_z + r \times \cos \theta \times u_z + r \times \sin \theta \times v_z \\ \theta &= \sin^{-1} \frac{z_0 - P_z}{r \sqrt{u_z^2 + v_z^2}} - \sin^{-1} \frac{r u_z}{r \sqrt{u_z^2 + v_z^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

계산된 θ 값을 이용하여 회전거동상에 존재하는 점을 계산한다.

3. 서브프레임의 최적 맞춤

3.1 최적 맞춤

서브프레임의 자세를 정하기 위해서 측정 테

이터의 설계 데이터로 변환하여야 한다. 하지만 서브프레임의 측정 데이터는 서브프레임 자체의 제작상의 오차, 측정상의 오차 그리고 측정장비의 좌표와 도면의 좌표 차이로 인하여 정확하게 설계 데이터와 일치하지 않는다. 이를 해결하기 위하여 두 데이터군 사이의 최적 맞춤을 수행하여야 하며 이는 비선형 최적화 문제가 된다. 이와 관련하여 많은 연구가 있었으며, 본 연구에서는 반복을 하지 않고 효율적인 계산이 가능한 방법인, 비정칙치 분해(singular value decomposition, SVD)를 이용한 최소 자승법을 사용하여 최적 맞춤을 한다.

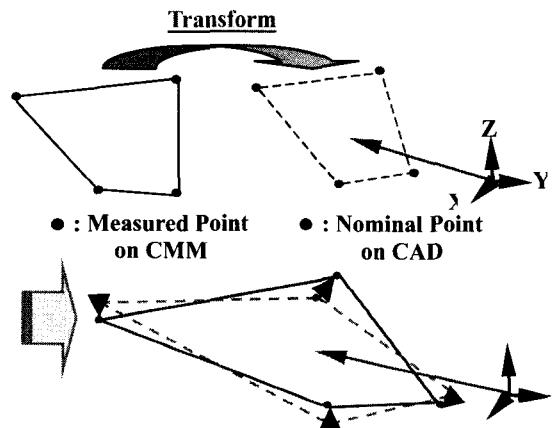


Fig. 9 Best fitting for sub frame

최적 맞춤을 수행하기 위하여, 측정 데이터와 설계 데이터 사이에 식 (4)와 같이 오차를 정의하고 목적함수를 최소화 시킨다.

$$\begin{aligned} \text{minimize } e^2(\hat{R}, \hat{\mathbf{T}}) &= \sum_{i=1}^4 \left\| \mathbf{d}_i - (\hat{R} \times \mathbf{m}_i + \hat{\mathbf{T}}) \right\|^2 \\ \text{subject to } \left\| \hat{R} \right\| &= 1, \quad \hat{R}^T \hat{R} = I \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)를 전개하기 위해서는 두 데이터군이 동일한 중심을 가져야 한다.² 따라서 식 (5)와 같이 각각의 중심을 이용해 새로운 데이터 군을 정의한다.

$$\bar{\mathbf{d}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \mathbf{d}_i \quad \mathbf{d}_{Ci} = \mathbf{d}_i - \bar{\mathbf{d}}$$

$$(5)$$

$$\bar{\mathbf{m}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \mathbf{m}_i \quad \mathbf{m}_{Ci} = \mathbf{m}_i - \bar{\mathbf{m}}$$

식 (4)의 목적함수는 식 (6)과 같이 정의된다.

$$e^2(R) = \sum_{i=1}^4 \left\| \mathbf{d}_{Ci} - \hat{R} \mathbf{m}_{Ci} \right\|^2$$

$$(6)$$

$$= \sum_{i=1}^4 (\mathbf{d}_{Ci}^T \mathbf{d}_{Ci} + \mathbf{m}_{Ci}^T \mathbf{m}_{Ci} - 2 \mathbf{d}_{Ci}^T \hat{R} \mathbf{m}_{Ci})$$

식 (6)의 최적화 문제는 직교 프로크루테스 (Orthogonal Procrustes Problem) 문제로 알려져 있으며 비정칙치 분해를 이용하여 해를 구한다.⁷ 식 (6)에서 마지막 항이 최대화 될 때 목적함수를 최소화하는 최적값을 얻을 수 있으며, 이것은 식 (7)과 같은 상관 행렬을 정의할 때 행렬의 자취 (trace)를 최대화하는 문제와 같다.

$$H = \sum_{i=1}^4 \mathbf{m}_{Ci} \mathbf{d}_{Ci}^T$$

$$(7)$$

상관행렬 H 를 식 (8)과 같이 비정칙치 분해 한다.

$$H = USV^T$$

$$(8)$$

식 (6)의 마지막 항을 최대화시키거나 자취의 최대값을 만족하는 회전변환행렬은 $\hat{R} = V\hat{U}$ 와 같다.² 하지만 심하게 왜곡된 데이터나 평면에 가까운 점들을 변환할 때는 반대 방향으로 발생할 수 있기 때문에 라그랑지 멀티플라이어를 이용하여 식 (9)와 같이 제시하였다.^{5,6}

$$\hat{R} = U \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \vdots & \det(UV^T) \end{pmatrix} V^T$$

$$(9)$$

최적 병진 변환, \hat{T} 은 회전 변환된 측정 데이터의 중심을 설계 데이터의 중심으로 정렬시키는 벡터가 되며, 식 (10)에 나타나 있다.

$$\hat{T} = \bar{\mathbf{d}} - \hat{R} \times \bar{\mathbf{m}}$$

$$(10)$$

3.2 시뮬레이션 및 실험

서브프레임의 변환 시뮬레이션을 위하여, 각 지지부의 설계 데이터 주위에 정규분포를 가지는 1000 개의 랜덤 데이터를 생성하였다. 서브프레임의 목록과 설계 데이터는 Fig. 10 과 Table 1 에 나타나 있다.

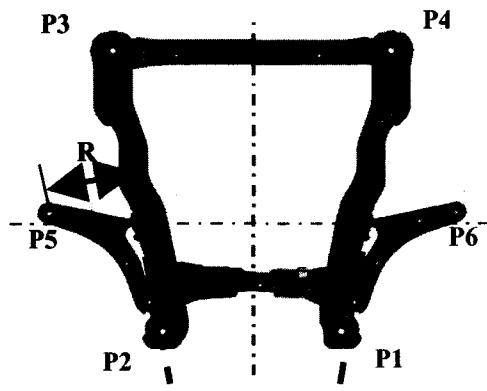


Fig. 10 Index of points and a radius of rotation

Table 1 CAD specification of each points and radius
(unit: mm)

	x	y	z
P1	438	318	-3
P2	438	-318	-3
P3	-622	-494	93
P4	-622	494	93
P5	-15.3	-723.9	-70.6
P6	-15.3	723.9	-70.6
R		308.727	

생성된 데이터들을 이용하여 최적 맞춤 시뮬레이션을 하였으며 오차는 잔차제곱합(Sum of squares error, SSE)으로 정의를 하였다. 초기 생성 데이터가 가지는 오차와 시뮬레이션 결과 데이터가 가지는 오차의 차이는 Fig. 11 에 나타나며 평균 0.6717 의 오차가 줄어든 것을 나타낸다.

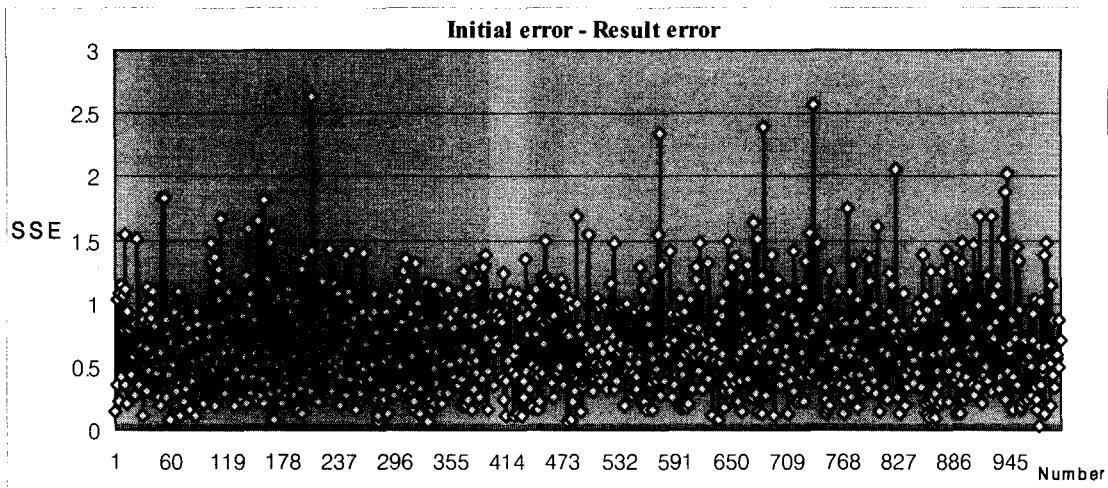


Fig. 11 SSE difference between initial and result error

3 개의 직선 이송 스테이지와 1 개의 회전축을 가지는 Fig. 12 의 비전 시스템을 이용하여 서브프레임과 프런트 로우어 암을 20 회 측정하였다.

데이터는 서브프레임 자체의 제작상의 오차임을 알 수 있다.

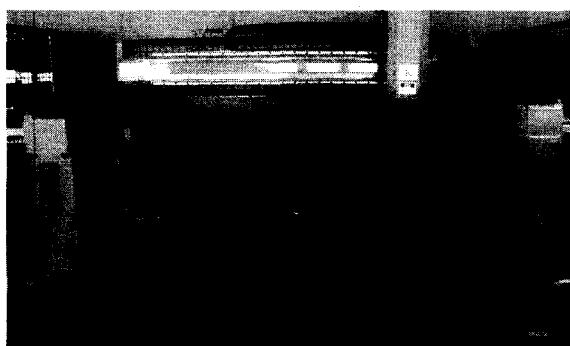


Fig. 12 Vision system to inspect sub frame & front lower arm

볼 조인트인 P5 와 P6 을 계산하기 위하여 설계 데이터의 z 값인 -70.6 인 경우의 데이터를 계산하였으며, 20 회 측정의 평균값들은 Table 2 에 나타나 있다. Table 2 는 각 점의 좌표성분에 대한 오차를 보여주며, 제조상의 오차와 측정상의 오차를 포함한 수치이다. 측정상의 오차는 반복정밀도로 판단할 수 있으며 실험에서 표준 편차는 각 점의 모든 좌표에서 $1.0E-04$ 이하로 나타난다. 즉, 실험 결과에서 측정오차는 무시 가능하며, 주어진

Table 2 Result of experiment (unit: mm)

	Specifi-cation	Measurement (Final result)	Dimensional Error
P1	x 438.000	437.293	-0.707
	y 318.000	318.572	0.572
	z -3.000	-2.987	0.013
P2	x 438.000	437.768	-0.232
	y -318.000	-318.715	-0.715
	z -3.000	-2.928	0.072
P3	x -622.000	-621.531	0.469
	y -494.000	-492.928	1.072
	z 93.000	92.925	-0.075
P4	x -622.000	-621.530	0.470
	y 494.000	493.070	-0.930
	z 93.000	92.990	-0.010
P5	x -15.300	-15.292	0.008
	y -723.900	-724.508	-0.608
	z -70.600	-70.600	0.000
P6	x -15.300	-15.990	-0.690
	y 723.900	723.882	-0.018
	z -70.600	-70.600	0.000
Left	R 308.727	308.611	-0.116
Right	R 308.727	306.054	-2.673

4. 결론

본 연구에서는 서브프레임의 지지부와 볼 조인트의 좌표를 수치적으로 제시하였다. 측정 데이터를 설계 데이터로 변환하기 위하여 비정칙적 분해를 이용한 최소자승법을 이용하였으며, 기존에

측정이 불가능하였던 볼 조인트의 좌표를 기하학적 특징을 이용하여 수치적으로 제시하였다. 볼 조인트의 좌표를 수치적으로 제시함으로써, 조향 성능에 영향을 가지는 변수들의 계산이 가능하게 되었으며 프런트 샤시 모듈에 대한 합리적인 적부 판단이 이루어질 수 있게 되었다.

참고문헌

1. Horn, B. K. P., "Closed-form solution of absolute orientation using orthonormal matrices," *J. Opt. Soc. Am. Ser. A*, Vol. 5, pp.1127-1135, 1987.
2. Arun, K. S., Huang, T. S. and Blostein, S. D., "Least-squares fitting of two 3-D point sets," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. PAMI-9, pp. 698-700, 1987.
3. Horn, B. K. P., "Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions," *J. Opt. Soc. Am. Ser. A*, Vol. 4, pp. 629-642, 1987.
4. Eggert, A. W., Lorusso, A. and Fisher, R. B., "Estimating 3-D rigid body transformations: a comparison of four major algorithms," *Machine Vision and Application*, Vol. 9, pp. 272-290, 1997.
5. Umeyama, S., "Least-squares estimation of transformation parameters between tow point patterns," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 13, pp. 376-380, 1991.
6. Kanatani, K., "Analysis of 3-D rotation fitting," *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, Vol. 16, pp. 543-549, 1994.
7. Samuel, G. L., Yang, S. H., "Determination and mapping of measurement and design coordinate systems using computational geometric techniques," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Accepted, 2003.
8. Schonemann, P., "A generalized solution of the orthogonal procrustes problem," *Psychometrika*, Vol. 31, pp. 1-10, 1966.
9. Yau, H. T., Menq, C. H., "A unified least squares approach to the evaluation of geometric errors using discrete measurement data," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, pp.1269-1290, 1996.